

## BAB – 13 B U N Y I

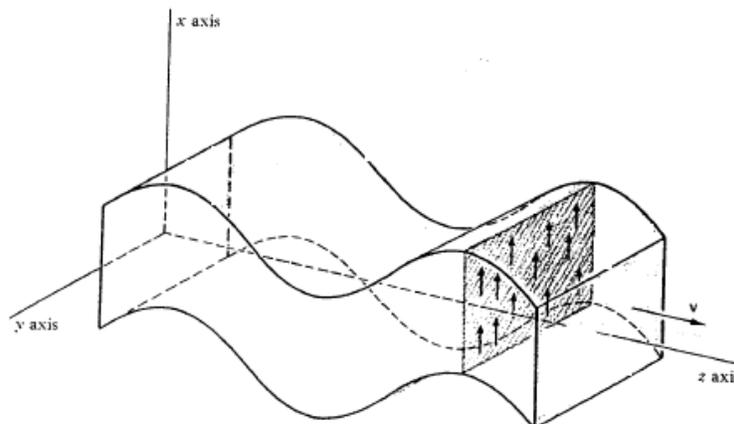
Bunyi adalah sebuah gelombang mekanik longitudinal yang menyebar melalui udara, air, dan media material lainnya. bunyi adalah bagian yang paling penting dalam kehidupan semua hewan tingkat tinggi, yang mempunyai organ khusus untuk menghasilkan dan mengetahui gelombang ini. Yang berarti dari bunyi, hewan (khususnya jantan) sangat mahir untuk berkomunikasi dengan yang lain dan untuk memperoleh informasi tentang sekitarnya.

Bab ini menjelaskan bagian fisik dari gelombang mekanik longitudinal dan berhubungan dengan kelebihan fisik mereka untuk sensasi psikologi mereka berhasil dalam mendengar. Fisika dari hasil kata, yang diberikan dalam sesi terakhir, memberi kesempatan untuk mengembalikan ke prinsip umum dari gerak gelombang dan perlakuan bunyi diluar dan dalam bab 12.

### 13.1 GELOMBANG MEKANIK LONGITUDINAL

Bab 12 menjelaskan gerak gelombang secara umum, digunakan sebagai contoh sebuah gelombang transversal dalam renggangan tali. Bagaimanapun, ketika sebuah tali dalam medium satu dimensi, contoh ini harus diperluas secara alami dari sebuah gelombang dalam medium tiga dimensi untuk dimengerti.

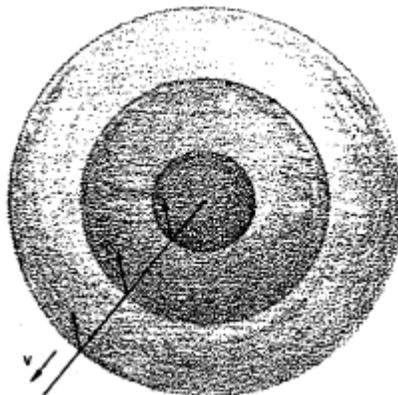
Kerutan pada permukaan air adalah contoh yang terkenal dari gelombang dua dimensi. gambar 13.1 menunjukkan gelombang transversal tiga dimensi pada perpindahan parallel di sumbu z ketika medium berosilasi paralel pada sumbu x.



Gambar 13.1 gelombang bidang sinusoidal.

Ini dikenal dengan sebutan gelombang bidang karena semua titik dalam sebuah bidang tegak untuk sumbu  $z$  mempunyai perpindahan yang sama pada waktu yang sama. Gelombang bidang juga karakteristiknya menunjukkan penyebaran tunggal. Jika perpindahan dari variasi gelombang bidang seperti menunjukkan sinus panjang dari penyebaran, gelombang ini disebut gelombang bidang sinusoidal. Ini analog dari gelombang sinus satu dimensi.

Ketika sebuah batu dijatuhkan kedalam sebuah kolam, riak dari lingkaran konsentris berpencar dalam semua bagian dari batu. Analog gelombang dalam tiga dimensi adalah sebuah gelombang sferis yang memancar keluar dalam daerah konsentris dari titik pusat (gambar 13.2). Dalam sebuah gelombang sferis transversal, tiap titik memberikan osilasi paralel pada kulit sferis, dalam gelombang sferis longitudinal, titik pada kulit berosilasi radial dalam dan keluar, dengan posisi keseimbangan. Jika perpindahan dari variasi gelombang sferis seperti sinus setiap garis radial, gelombang ini adalah gelombang sferis sinusoidal.



Gambar 13.2 gelombang sferis



Gambar 13.3 daerah R adalah bagian terkecil yang menjadi elemen dan daerah R' tidak

Gelombang mekanik longitudinal dapat menyebar melalui padatan, cairan dan media gas, tetapi gelombang mekanik transversal dapat menyebar hanya melalui padatan. Ini karena titik dalam osilasi paralel gelombang transversal pada bidang (gambar 13.1), yang menghendaki kekuatan paralel medium pada bidang. Medium padat dapat memakai setiap kekuatan, tetapi tidak pada medium aliran. Akibatnya, hanya gelombang longitudinal yang dapat menyebar dalam media aliran seperti air dan udara.

Kita telah menggunakan titik yang paling kecil dari medium, tetapi kata yang lebih baik adalah 'elemen', karena kita tidak menggunakan titik dalam arti matematik. Ini kita artikan sebuah bagian kecil dari medium yang berpindah sebagai unit tunggal. Hasilnya, ukuran dari setiap bagian, atau elemen, sekecil mungkin membandingkan gelombang panjang dari penyebaran gelombang melalui medium karena jika elemen terlalu besar, bagian berbeda akan menghasilkan perpindahan yang berbeda pula pada waktu yang sama dan elemen tidak dapat pindah sebagai unit tunggal. Untuk ilustrasi tali dalam gambar 13.3, bagian R' adalah terlalu besar untuk sebuah elemen karena bagian beda terlihat perpindahan yang berbeda. Bagian R', bagaimanapun cukup kecil untuk elemen karena berbeda dalam perpindahan dari bagian yang terabaikan.

Pada bagian lain, sebuah elemen harus cukup besar untuk mengisi jutaan molekul. Jika sebuah elemen berisi beberapa molekul, bergerak secara acak akan menyebabkan elemen tercabut sendiri, juga tidak akan mempunyai posisi ekuilibrium yang baik. Meskipun, gerak acak dari jutaan molekul membentang untuk

menghalangi yang lain, dan jika elemen cukup besar, akan mempunyai posisi ekuilibrium yang terbatas.

Karena molekul terlalu kecil, tidak mungkin mempunyai elemen dari ukuran yang memuaskan pada kedua kondisi ini. Untuk contoh, ketika 1 mol berisi  $6 \times 10^{23}$  molekul, sebuah elemen dengan  $10^9$  molekul adalah

$$n = \frac{10^9}{6 \times 10^{23}} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ mol}$$

Volume ( $V$ ) ditempati oleh  $n$  mol dari gas ideal diberikan oleh

$$V = \frac{nRT}{p}$$

Demikianlah dalam sebuah gas pada tekanan 1 atm ( $p = 1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ) dan pada temperature  $27^\circ\text{C}$  ( $T=300\text{K}$ ),  $10^9$  molekul dengan volume

$$\begin{aligned} V &= \frac{(1.6 \times 10^{-13})(8.3 \text{ J/K})(300\text{K})}{1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2} \\ &= 3.9 \times 10^{-15} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Ini adalah volume dari sebuah kubus dengan sisi  $1.6 \times 10^{-5} \text{ m} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ cm}$ , yang lebih kecil daripada gelombang panjang. Karena itu volume dari udara dengan ukuran kondisi yang memuaskan untuk sebuah elemen.

Sebagai sebuah penyebaran gelombang longitudinal melalui udara, elemen dari udara berpindah kebelakang dan keluar posisi ekuilibrium. Gambar 13.4a plot perpindahan dalam gelombang sinus, dan gambar 13.4b menunjukkan bagian dalam perpindahan elemen udara. Sebuah perpindahan positif dalam gambar 13.4a sama dengan untuk sebuah perpindahan longitudinal dari elemen sebelah kanan dan sebuah perpindahan negatif sama dengan perpindahan sebuah elemen sebelah kiri.

Catatan bahwa elemen disisi yang lain dari perpindahan simpul A dalam gambar 13.4 adalah perpindahan arah ke simpul, juga massa jenis dan tekanan dari udara pada poin ini diatas normal. Juga elemen dari sisi lain dari perpindahan simpul B adalah perpindahan dari simpul, juga pada massa jenis dan tekanan pada poin ini dibawah normal. Dalam fakta, tekanan osilasi pada nilai normal hanya sebagai osilasi

elemen pada posisi ekuilibrium. Jika  $p_0$  adalah tekanan normal dan  $p$  adalah tekanan pada poin utama dalam sebuah gelombang, variasi tekanan  $y_p$  dibatasi pada

$$y_p = p - p_0$$

Sebuah gelombang longitudinal sebagai contoh pada variasi tekanan seperti contoh dari perpindahan.

Variasi tekanan untuk gelombang dalam gambar 13.4b ditunjukkan dalam gambar 13.4c. itu adalah gelombang sinus, seperti perpindahan gelombang dalam gambar 13.4a, kecuali pada antinoda terjadi pada simpul dari perpindahan gelombang, dan berubah-ubah. Perpindahan gelombang dapat dituliskan

$$y_p = A_p \sin\left(\frac{x}{\lambda} 360^\circ\right) \quad 13.1$$

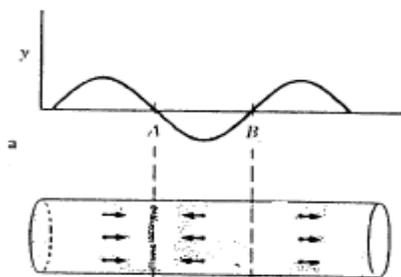
Dimana variasi amplitudo tekanan  $A_p$  adalah perbedaan maksimum antara tekanan dalam gelombang dan tekanan normal. Variasi amplitudo tekanan ini sering digunakan untuk gelombang longitudinal sebagai gelombang tekanan lebih baik daripada perpindahan gelombang karena variasi tekanan yang biasanya ditemukan.

Telinga manusia dapat menerima gelombang mekanik longitudinal dengan frekuensi antara 20 dan 20000 Hz. Laju gelombangnya dalam udara adalah 343 m/s (table 13.1), juga panjang gelombang dari bunyi yang dapat didengar adalah antara

$$\lambda = \frac{343 \text{ m/s}}{20000 \text{ Hz}} = 1.71 \times 10^{-2} \text{ m} = 1.71 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{343 \text{ m/s}}{20 \text{ Hz}} = 17.1 \text{ m} = 1710 \text{ cm}$$

Gelombang dalam rentang dapat didengar disebut bunyi. Gelombang dengan frekuensi diatas 20000 Hz disebut ultrasonic dan gelombang dengan frekuensi dibawah 20 Hz disebut infrasonik. Klasifikasi ini tergantung pada kelebihan dari mekanisme pendengaran manusia, tidak mempunyai dasar fisika yang signifikan, tetapi karena untuk kebutuhan khusus adalah dibutuhkan untuk mengetahui gelombang ultrasonik dan infrasonik.



gambar 13.4 perpindahan dalam gelombang longitudinal (a) plot perpindahan longitudinal pada elemen gas berlawanan dengan posisi ekuilibrium. (b) perpindahan pada elemen gas. (c) plot dengan variasi tekanan gas yang berlawanan posisinya.

### 13.2 Kecepatan Bunyi

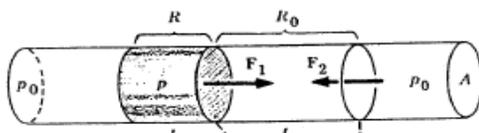
Penyebaran dari gelombang longitudinal melalui media material diterangkan secara lengkap dalam hukum mekanika. Sekarang akan dipelajari bunyi (akustik) adalah bagian dari mekanika. Hubungan antara bunyi dan mekanika yang pertama ditunjukkan oleh Newton, yang menggunakan hukum kedua dari gerak untuk menghitung kecepatan bunyi. Kita akan memberikan versi yang sederhana dari memperoleh perintah untuk menunjukkan mekanisme penyebaran bunyi. (Asal yang sama untuk kecepatan gelombang transversal pada tali akan diberikan dalam appendix V).

Sederhananya kita akan berfikir sebuah pulsa berpindah melalui medium silinder (gambar 13.5), udara di dalam tabung. Pulsa terdiri dari daerah lokasi R dengan tekanan  $p$  yang lebih besar daripada tekanan gangguan  $p_0$  di medium. Pulsa yang berpindah sepanjang silinder, elemen dari udara hanya berosilasi dalam posisi ekuilibrium, tidak akan berpindah dengan pulsa. Demikianlah pulsa berpindah dari daerah R dalam gambar 13.5a untuk daerah R' dalam gambar 13.5b dengan menekan udara dalam daerah  $R_0$  lebih baik daripada perpindahan udara dalam daerah R.

Waktu  $t$  menghendaki untuk pulsa yang berpindah dari R ke R' adalah hubungan untuk kecepatan gelombang  $v$  dan sepanjang  $L_0$  dari  $R_0$  oleh:

$$t = \frac{L_0}{v}$$

Waktu gas dalam  $R_0$  memperoleh tekanan dalam R' yang berpindah beberapa molekul dalam  $R_0$  sebelah kanan. Sepanjang  $L$  dari R' lebih kecil daripada  $L_0$  dengan



$L_o - L$ . beberapa molekul dalam  $R_o$  berpindah dalam jumlah penuh, dan beberapa tidak berpindah, juga rata-rata massa total udara dalam  $R_o$  berpindah dengan jarak

Gambar 13.5 pulsa bunyi yang terdiri dari daerah R dengan tekanan  $p$  adalah tekanan atmosfer bagian atas  $p_o$ . pulsa berpindah ke kanan, udara dalam daerah  $R_o$  ditekan kedalam daerah R'

$$d = \frac{1}{2}(L_o - L)$$

Dari dua persamaan untuk waktu dan jarak, akselerasi dari gas dalam daerah  $R_o$  dapat dikalkulasi dari persamaan 4.3. Hasilnya adalah

$$\begin{aligned} a &= \frac{d}{\frac{1}{2}t^2} = \frac{\frac{1}{2}(L_o - L)}{\frac{1}{2}(L_o/v)^2} \\ &= \frac{(L_o - L)v^2}{L_o^2} \end{aligned} \quad 13.2$$

Dari hukum kedua Newton, hubungan ini adalah persamaan untuk kekuatan total dalam  $R_o$  dibagi dengan massa  $m$  dari  $R_o$ :

$$a = \frac{F}{m} \quad 13.3$$

Ada dua kuat dari  $R_o$ . Pulsa menggunakan tekanan  $p$  pada sisi kiri  $R_o$ , dan gas dalam tabung yang berusaha memakai tekanan  $p_o$  di sebelah kanan. Demikianlah jika silinder mempunyai daerah sudut silang  $A$ , dengan gaya

$$F_1 = pA$$

Sebelah kanan, dan gayanya adalah

$$F_2 = p_oA$$

Sebelah kiri. Total gaya dalam  $R_o$  adalah

$$F = pA - p_oA = (p - p_o)A \quad 13.4$$

Dan ditunjukkan untuk sebelah kanan. Masukkan persamaan 13.4 dan 13.2 dalam persamaan 13.3, kita peroleh

$$\frac{(L_o - L)v^2}{L_o^2} = \frac{(p - p_o)A}{m}$$

Ini dapat diselesaikan untuk  $v^2$  yaitu

$$\begin{aligned} v^2 &= \frac{(p - p_o)A / m}{(L_o - L) / L_o^2} \\ &= \frac{(p - p_o)L_o^2 A}{(L_o - L)m} \end{aligned} \quad 13.5$$

Ketika  $L_o A$  adalah volume  $V_o$  dari  $R_o$  dan  $LA$  adalah volume  $V$  dari  $R$ , dengan mengalikan pembilang dan penyebut dari persamaan 13.5 dengan  $A$  kita peroleh

$$\begin{aligned} v^2 &= \frac{(p - p_o)V_o^2}{(V_o - V)m} = \frac{B}{\rho} \\ \text{atau } v &= \sqrt{\frac{B}{\rho}} \end{aligned} \quad 13.6$$

Dengan  $\rho = m/V_o$  adalah massa jenis dari medium dan

$$B = \frac{p - p_o}{(V_o - V) / V_o}$$

Adalah modulus bulk. Modulus bulk adalah perbandingan dari pertukaran dalam tekanan,  $p - p_o$ , untuk pertukaran volume,  $(V_o - V)/V_o$ , dihasilkan oleh perubahan tekanan. Untuk perubahan tekanan kecil yang seharusnya,  $B$  adalah konstanta dari karakteristik medium. Modulus bulk dari beberapa cairan yang umum diberikan oleh tabel 10.4. Persamaan 13.6 hanya untuk cairan dan gas. Untuk zat padat, modulus bulk digantikan oleh modulus Young  $E$ , dengan

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Tabel 10.2 diberikan modulus Young dari beberapa zat padat yang umum.

Modulus Young dan modulus Bulk adalah pengukuran yang tidak kaku, atau tidak dapat ditekan, dari substansi. Bahan yang keras seperti besi atau granit

menghendaki regangan yang besar untuk mengubah panjang dalam jumlah yang kecil, juga modulus Young yang luas. Gas, dibagian lain, mudah dikompres dan modulus Bulknya kecil. Akibatnya kecepatan bunyi dalam granit dan zat padat lainnya adalah lebih luas daripada kecepatan bunyi dalam gas. Ini diperlihatkan pada tabel 13.1, yang memberikan kecepatan bunyi dalam substansi yang bervariasi.

Catatan: Persamaan 13.6 adalah hanya nilai dalam menghitung kecepatan bunyi  $v$  dalam aliran modulus Bulk yang diketahui. Tetapi, biasanya lebih mudah untuk mengukur  $v$  daripada  $B$ , dalam persamaan 13.6 digunakan untuk menentukan  $B$  dalam bentuk  $v$ , lebih baik sebagai gantinya.

Ada satu pengecualian penting: modulus Bulk dalam gas ideal dapat ditentukan dari hukum gas ideal, dan kecepatan bunyi dalam gas dapat ditentukan dari prinsip pertama. Jika diasumsikan bahwa temperatur dari gas tidak berubah ketika ditekan (tekanan isothermal), volume dan tekanan dalam daerah  $R$  dan  $R_0$  dari gambar 13.5 adalah hubungan dengan hukum gas ideal (persamaan 8.9)

**Tabel 13.1 Kecepatan bunyi dalam substansi yang bervariasi.**

Temperatur diberikan oleh substansi dalam variasi kecepatan yang signifikan dengan temperatur. Kecepatan dalam zat padat tergantung pada komposisi dan stuktur pada zat padat, hanya nilai aproksimasi yang dapat diberikan.

Sustansi	Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	Kecepatan m/s
Gas		
Karbon dioksida	0	259
Oksigen	0	316
Udara	0	331
	20	343
Nitrogen	0	334
Helium	0	965
Cairan		
Merkuri	25	1450
Air	25	1498
Air laut	25	1531
Zat padat		
Batu gosok		1800

Timah hitam	2100
Lucit	2700
Emas	3000
Besi	5000-6000
Kaca	5000-6000
Granite	6000

Mengurangi  $V_0 p$  dari kedua sisi dari persamaan yang diberikan

$$Vp - V_0 p = V_0 p_0 - V_0 p$$

$$p(V - V_0) = V_0(p_0 - p)$$

Membagi kedua bagian dengan  $V - V_0$  kita peroleh

$$p = \frac{V_0(p_0 - p)}{V - V_0} = B \quad \text{isothermal} \quad 13.7$$

Demikianlah modulus Bulk isothermal dari gas ideal adalah persamaan untuk tekanan gas. Kemudian, dari persamaan 13.6, kecepatan bunyi dalam gas ideal adalah

$$v = \sqrt{\frac{p}{\rho}} \quad 13.8$$

**Catatan:** Tekanan  $p$  dalam persamaan 13.8 adalah tekanan gas ketika dikompres. Tetapi, ini berbeda hanya waktu dari tekanan tidak terganggu, jadi nilai tidak terganggu dapat digunakan untuk menghitung  $v$  dengan akurasi yang cukup.

Persamaan 13.8 pertama diperoleh oleh Newton, tetapi tidak memberikan nilai untuk  $v$ . Untuk contoh, pada tekanan atmosfer ( $p = 1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ) dan  $0^\circ\text{C}$ , massa jenis udara adalah  $1.30 \text{ kg/m}^3$  (tabel 7.2). dengan nilai ini, kecepatan bunyi dari persamaan 13.8 adalah

$$v = \sqrt{\frac{p}{\rho}} = \sqrt{\frac{1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2}{1.30 \text{ kg/m}^3}}$$

$$= \sqrt{7.77 \times 10^4 \text{ Nm}^2 / \text{kg}}$$

$$= 279 \text{ m/s}$$

Dengan 15 persen hilang dari nilai pengukuran dari 331 m/s.

Kesalahan dalam asumsi bahwa temperatur dari konstanta gas. Kenyataannya, ketika gelombang bunyi lewat melalui daerah, variasi tekanan gas begitu cepat, tidak cukup panas untuk masuk atau meninggalkan daerah. Di bawah kondisi temperatur osilasi cepat dengan tekanan, ketika panas bertukar. Ini disebut proses adiabatik. Untuk kompres adiabatik dari gas ideal, modulus bulk dapat ditunjukkan

$$B = \gamma p \text{ adiabatik} \tag{13.9}$$

Dengan  $\gamma$  adalah konstanta dari setiap gas. Variasi mendekati 1.0 untuk gas poliatomik yang sangat kompleks  $5/3 = 1.67$  untuk gas monoatomik seperti helium. Tabel 13.2 diberikan nilai dari  $\gamma$  untuk gas umum.

Jika persamaan 13.9 digunakan dalam persamaan 13.7, kita peroleh persamaan untuk kecepatan bunyi dalam gas:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} \tag{13.10}$$

Untuk contoh,  $\gamma$  udara adalah 1.40, kalkulasi kecepatan bunyi dalam udara

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{1.40 \times 7.77 \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}} \\ &= 330 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Persetujuan yang bagus dengan pengukuran nilai.

**Tabel 13.2  $\gamma$  untuk variasi gas**

Gas	$c_p/c_v = \gamma$
Argon, Ar	1.67
Helium, He	1.67
Merkuri, Hg	1.67
Oksigen, O <sub>2</sub>	1.40
Nitrogen, N <sub>2</sub>	1.40
Udara	1.40
Klorin, Cl <sub>2</sub>	1.34
Karbon dioksida, CO <sub>2</sub>	1.29
Sulfur dioksida, SO <sub>2</sub>	1.29
Etana, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1.19
Dimetil etel, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	1.16

Catatan kuantitas  $\gamma$  adalah persamaan  $c_p/c_v$ , perbandingan dari panas spesifik gas pada konstanta tekanan untuk panas spesifik dari gas pada konstanta volume. Itu dapat ditunjukkan pada kuantitas adalah  $\frac{5}{3}$  untuk gas monoatomik dan  $\frac{7}{5}$  untuk gas diatomic. Walaupun akan terlalu jauh untuk rincinya, dengan catatan menarik bahwa kecepatan bunyi dalam udara dapat bentuk komplet dari prinsip mekanik dan termodinamika.

Persamaan 13.10 dilihat tercantum bahwa kecepatan bunyi tergantung pada tekanan, tetapi nyatanya, perbandingan  $p/\rho$  berdiri sendiri pada  $p$ . ini dapat dilihat dari hukum gas ideal,

$$pV = nRT$$

dituliskan dalam bentuk

$$p = \frac{nRT}{V} = \frac{nNkT}{NV}$$

Dimana  $N$  adalah bilangan Avogadro. Dalam bab 8 konstanta Boltzman  $k$  adalah dibatasi pada

$$k = \frac{R}{N}$$

Dan massa jenis  $\eta$  diberikan pada

$$\eta = \frac{nN}{V}$$

Karena itu, hukum gas ideal dapat dituliskan

$$p = \eta kT$$

Tetapi massa jenis  $\rho$  pada  $\eta$  waktu dan massa  $m$  dari molekul individu

$$\rho = \eta m$$

Karena itu, diperoleh

$$p = \frac{\rho kT}{m}$$

Jadi persamaan 13.10 dapat dituliskan

$$v = \sqrt{\frac{\gamma k T}{m}} \quad 13.11$$

Ini menunjukkan bahwa kecepatan tergantung hanya pada temperatur gas dan massa molekul. Untuk cepatnya, diberikan temperatur, kecepatan bunyi pada helium ( $m = 4$  u) lebih cepat daripada dalam udara (massa rata-rata = 29 u).

### 13.3 Intensitas

Bunyi yang lemah berhubungan dengan energi yang dibawa oleh gelombang bunyi. Bunyi lemah menimbulkan sifat pendengaran untuk bunyi yang istimewa, dimana energi dari gelombang bunyi adalah kuantitas objektif fisik. Hubungan antara kuantitas ini dipelajari dalam cabang ilmu psikologi yang dikenal dengan psikologi fisik

#### *Definisi dari intensitas*

Intensitas  $I$  dari sebuah gelombang adalah energi silang daerah dalam waktu. Eksperimen ditentukan oleh pengukuran energi  $E$  pada sebuah detektor dalam waktu  $t$ . Intensitas adalah persamaan energi dibagi dengan waktu dan daerah  $A$  pada detektor:

$$I = \frac{E}{At} \quad 13.12$$

Dalam mks intensitas adalah  $J/m^2 \cdot s$  atau watt per meter kuadrat ( $W/m^2$ ).

Untuk contoh, misalnya bahwa selama 5s selang waktu sebuah mikropon menerima energi  $1.5 \times 10^{-11} J$ . Jika mikropon mempunyai daerah aktif pada  $3 \text{ cm}^2$  ( $3 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ), intensitas bunyi adalah

$$\begin{aligned} I &= \frac{E}{At} = \frac{1.5 \times 10^{-11} J}{(3 \times 10^{-4} \text{ m}^2)(5s)} \\ &= 10^{-6} J / m^2 s = 10^{-6} W / m^2 \end{aligned}$$

Ini adalah intensitas dari bunyi dalam percakapan normal.

Dapat ditunjukkan (Appendix VI) bahwa intensitas gelombang sinus adalah hubungan untuk amplitudo tekanan  $A_p$  yaitu:

$$I = \frac{A_p^2}{2\rho v} \quad 13.13$$

Dengan  $\rho$  adalah massa jenis medium dan  $v$  adalah kecepatan gelombang dalam medium. Pada  $20^0\text{C}$  massa jenis udara adalah  $1.2 \text{ kg/m}^3$  dan kecepturnya adalah  $343 \text{ m/s}$ . Karena itu, dalam gelombang dengan intensitas  $10^{-6} \text{ W/m}^2$ , kuadrat dari amplitude tekanan adalah

$$\begin{aligned} A_p^2 &= 2\rho v I \\ &= (2 \times 1.2 \text{ kg/m}^3)(343 \text{ m/s})(10^{-6} \text{ J/m}^2 \text{ s}) \\ &= 8.2 \times 10^{-4} \text{ N}^2 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

Jadi amplitudo tekanan adalah

$$A_p = 2.86 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$$

Ini adalah perbedaan antara tekanan maksimum dalam gelombang dan tekanan udara tidak terganggu. Ketika tekanan udara normal kira-kira  $10^5 \text{ N/m}^2$ , tekanan dalam perubahan gelombang hanya 0.286 bagian per sejuta. (ini mengapa dalam persamaan 13.8 kita dapat mengembalikan tekanan terganggu  $p$  dengan tekanan tidak terganggu  $p_0$  tanpa kecenderungan nilai  $v$ ).

### ***Skala decibel***

Walaupun mengamati bunyi lemah ditambah dengan intensitas, hubungan antara kelemahan dan intensitas jauh dari linier. Sebagai contoh, dalam bacaan intensitas dari pengeras suara mungkin 100 kali lebih besar dari ruang depan daripada ruang belakang, tetapi perpindahan pendengar dari depan ke belakang hanya berkurang sedikit dalam kelemahan.

Dewasa ini dapat diketahui bunyi dengan intensitas yang kecil  $10^{-12} \text{ W/m}^2$  dan luas  $1 \text{ W/m}^2$ . dengan konveksi intensitas

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

Adalah titik nol pada skala level intensitas dikenal dengan skala decibel (dB). Pada skala ini, intensitas ditambah dengan factor 10 koresponden untuk menambah level

intensitas  $\beta$  dengan 10 dB. Demikianlah, ketika  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  sama dengan  $\beta = 0$  dB,  $10^{-11} \text{ W/m}^2 = 10I_0$  sama dengan  $\beta = 10$  dB,  $10^{-10} \text{ W/m}^2 = 10^2I_0$  sama dengan  $\beta = 20$  dB, dan  $10^{-6} \text{ W/m}^2 = 10^6I_0$  sama dengan  $\beta = 60$  dB. Matematikanya, tingkat intensitas  $\beta$  (dalam desibel) dari intensitas bunyi  $I$  ditemukan bentuk logaritmiknya

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad 13.14$$

Dimana  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ .

Intensitas diatas  $1 \text{ W/m}^2$ , sensasi perubahan gelombang dari bunyi untuk terasa. Itu adalah gelombang dengan intensitas yang lebih besar daripada  $1 \text{ W/m}^2$  lebih baik terdengar. Level intensitas dari gelombang pada ambang ditemukan pada persamaan 13.14 menjadi

$$\begin{aligned} \beta &= 10 \log \frac{1 \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} = 10 \log 10^{12} \\ &= 120 \text{ dB} \end{aligned}$$

Batas pendengaran manusia antara 0 dan 120 dB, faktor  $10^{12}$  dalam intensitas dan faktor  $10^6$  dalam amplitudo tekanan. Tabel 13.3 memberikan level intensitas  $\beta$  dan intensitas  $I$  dari beberapa bunyi umum. Untuk mengubah dari decibel ke watt per meter kuadrat dapat juga menggunakan tabel 13.14.

### **Klasifikasi Gelombang bunyi**

1. *Audiosonik* (20Hz – 20.000Hz) merupakan frekuensi bunyi yang dapat didengar oleh manusia pada umumnya.
2. *Infrasonik* (< 20 Hz) merupakan frekuensi bunyi yang lebih rendah dari 20Hz atau lebih rendah dari yang bisa didengar oleh manusia. (*Audiosonik*). Beberapa hewan yang mampu merespon gelombang ini adalah gajah dan ikan paus. Frekuensi ini juga digunakan oleh para geometris dan ahli fisika untuk mendeteksi gempa. Yaitu dengan alat seismograf.

3. *Ultrasonik* (>20.000Hz) merupakan frekuensi yang lebih tinggi dari 20.000Hz. beberapa hewan mampu mendengar frekuensi ini dengan baik. Contohnya Anjing. Hewan ini mampu mendengar sampai 25000Hz. Kucing mampu mendengar sampai 65000Hz, dan lumbalumba mampu mendengar sampai 150000Hz.

### ***Psikologi Pendengaran***

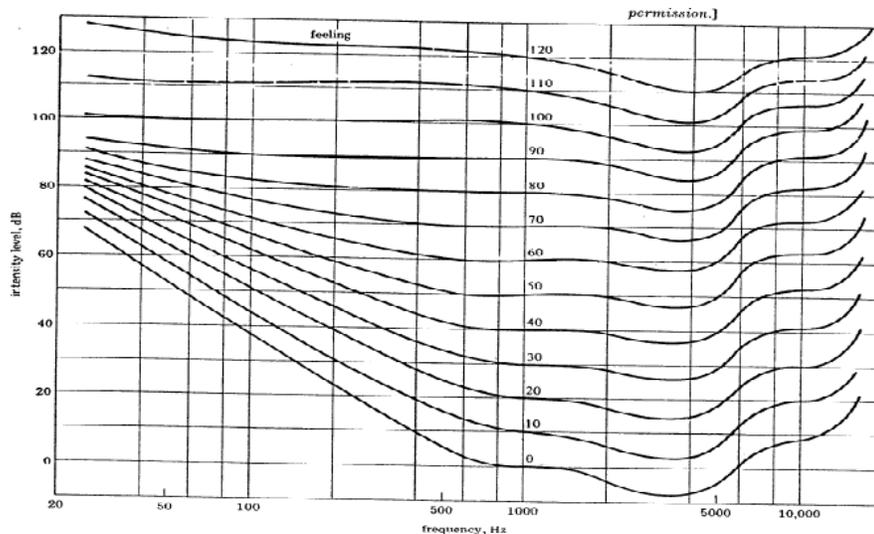
Walaupun perbandingan dari intensitas untuk mengetahui bunyi keras sampai lembut adalah  $10^{12}$ , kita tidak menyadari seperti faktor  $10^{12}$  dalam bunyi keras yang dapat kita dengar. Ini karena hubungan antara intensitas, yang simbol fisik dari bunyi, dan keras, atribut subjek, melibatkan psikologi dan proses psikologi dalam telinga dan otak.

**Tabel 13.3 Tingkat bunyi dan intensitas dari beberapa bunyi**

Level bunyi dB	Intensitas W/m <sup>2</sup>	Bunyi
0	$10^{-12}$	Batas pendengaran
10	$10^{-11}$	Geresik
20	$10^{-10}$	Bisikan (sepanjang 1m)
30	$10^{-9}$	Tenang
40	$10^{-8}$	Rata-rata rumah, kantor tenang
50	$10^{-7}$	Rata-rata kantor
60	$10^{-6}$	Percakapan normal, rata-rata lalu lintas
70	$10^{-5}$	Keributan dalam kantor
80	$10^{-4}$	Lalu lintas sibuk, disamping lalu lintas mobil
90	$10^{-3}$	
100	$10^{-2}$	Sepanjang kereta api
120	$10^0$	Toko mesin
140	$10^2$	Tekanan (sejauh 2m), batas dari pendengaran Pesawat jet (sejauh 30m)

Eksperimen psikologi fisik adalah rancangan untuk mengukur hubungan antara simbol fisik dari stimulus dan simbol subjektif dilihat sebagai individu.

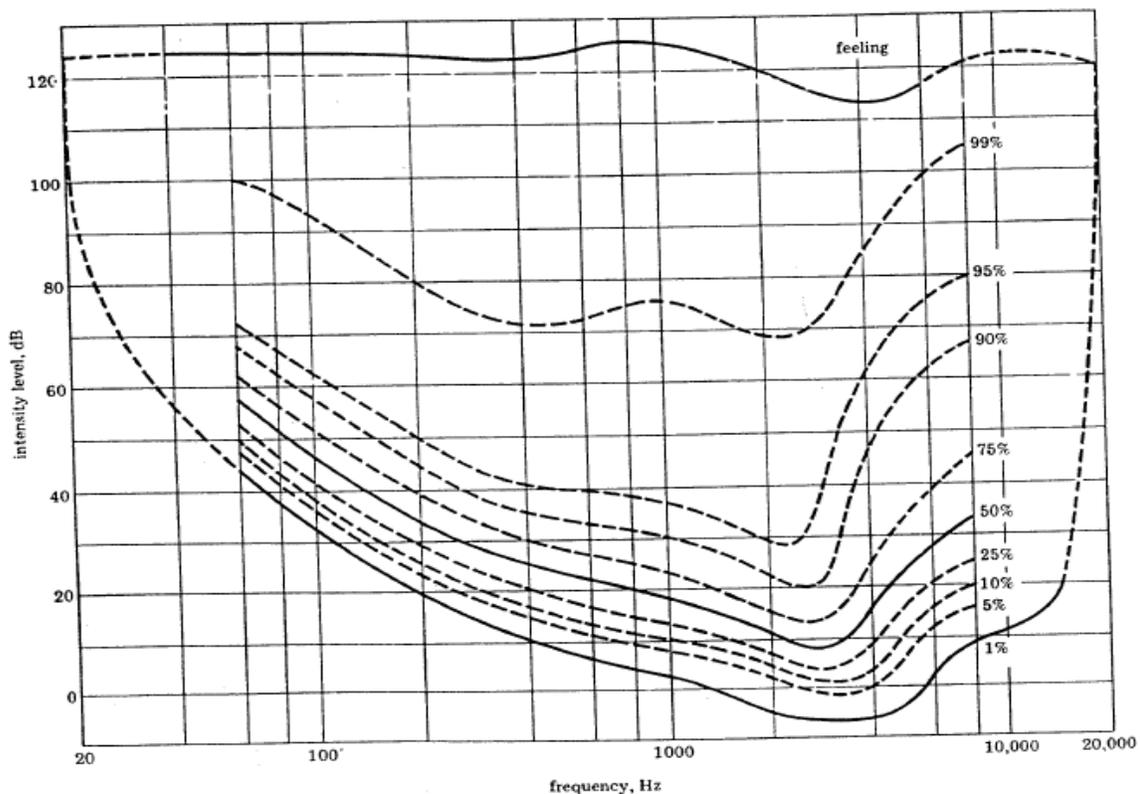
Sebagai contoh, dipertimbangkan berdasarkan eksperimen psikologi fisik. Perbandingan subjek standar bunyi, (bicara) frekuensinya 100 Hz dan level intensitasnya 60 dB untuk tes bunyi dengan frekuensi  $f$ . intensitas untuk tes bunyi berganti-ganti sampai subjek dipertimbangkan mempunyai kekerasan bunyi standarnya 1000 Hz. Ini diulang untuk rentang frekuensi sampai menjadi bentuk kurva seperti satu label dalam gambar 13.6 diperoleh. Tiap titik pada kurva diberikan level intensitas pada sinyal yang sama dengan frekuensi yang mempunyai kekerasan yang sama sebagai sinyal standar (1000 Hz pada 60 dB). Sebagai contoh, 100 Hz harus mempunyai level intensitas 72 dB dengan kekerasan 1000 Hz mempunyai 60 dB. Gambar 13.6 ditunjukkan kurva yang dihasilkan ketika sinyal standar 1000 Hz diberikan level intensitas yang berbeda. Dari kurva ini dilihat bahwa pendengaran yang tajam dengan frekuensi antara 3000 dan 4000 Hz.



Gambar 13.6 hubungan psikologi fisik dari intensitas yang kuat dan frekuensi. Setiap kurva memberikan intensitas bunyi dari frekuensi yang bervariasi yang mempunyai kenyaringan yang sama. Level kenyaringan adalah sesuai dengan level intensitas dengan sinyal 1000 Hz

Dalam tes lain, intensitas dari tes sinyal dengan frekuensi  $f$  berkurang sampai pendengaran subjek tidak panjang. Dengan mengulang ini untuk rentang

frekuensi, kurva dari pendengaran akurat manusia diperoleh. Gambar 13.7 meringkaskan hasil dari ribuan tes ini diberikan oleh pelayanan kesehatan masyarakat U.S. Masing-masing kurva persen penduduk dalam populasi yang mendengar pada kurva dibawah. Demikian, 90 persen dari penduduk dapat mendengar sinyal dibawah kurva 99 %, dimana hanya 10% dapat mendengar sinyal dibawah kurva 10 %. (1 % dari populasi tidak dapat mendengar dibawah level 99 % membutuhkan bantuan pendengaran, ketika mereka tidak dapat mendengar percakapan normal pada 60 dB). 1% kurva sering diambil sebagai standar utuh atau normal pendengaran. Hanya anak-anak dan anak muda yang dapat mendengar pada level ini, karena berkurangnya ketajaman dengan bertambahnya umur. Kurva ini mempunyai kemiringan antara 3000 dan 4000 Hz, yang mengindikasikan ketajaman pendengaran dalam rentang frekuensi ini.



Gambar 13.7 profil keakuratan pendengaran dari penduduk daerah bagian. Bilangan sebelah kanan tiap kurva adalah persen penduduk yang dapat mendengar semua sinyal dibawah kurva.

### *Variasi intensitas dengan jarak*

Intensitas yang dihasilkan bunyi dari pengurangan sumber dengan jarak dari sumber. Jika sumber kecil, bunyi menyebar keluar dalam bentuk gelombang sferis (gambar 13.8) dalam intensitas yang sama pada semua titik yang jaraknya sama dari sumber ( $d_1$ ). Ketika intensitas adalah energi unit daerah silang dalam unit waktu, energi per detik, atau kuat  $P_1$ , lewat melalui kulit ke jari-jari pusat  $d_1$  pada sumber adalah hasil dari intensitas  $I_1$  pada jarak ini dan area  $A_1 = 4\pi d_1^2$  dari kulit:

$$P_1 = A_1 I_1 = 4\pi d_1^2 I_1$$

Sama dengan, kuat  $P_2$  yang lewat melalui kulit ke jari-jari  $d_2$  adalah

$$P_2 = 4\pi d_2^2 I_2$$

Dari  $d_1$  ke  $d_2$ , beberapa energi gelombang akan diserap oleh udara, tetapi energi kecil jika jarak dari  $d_1$  ke  $d_2$  tidak terlalu jauh. Jika kita mengabaikan energi masuk, semua energi lewat melalui kulit 1 juga lewat melalui kulit 2. Karena itu energi per detik  $P_1$  melewati kulit 1 sama dengan energi per detik  $P_2$  melewati kulit 2, dari kedua persamaan terakhir kita dapatkan:

$$4\pi d_1^2 I_1 = 4\pi d_2^2 I_2$$

$$I_2 = \frac{d_1^2}{d_2^2} I_1 \tag{13.15}$$

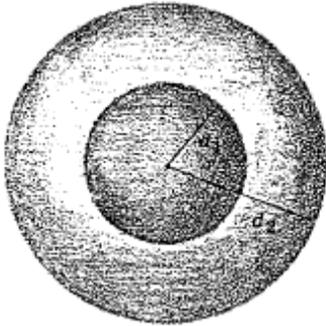
CATATAN : Persamaan 13.15 menunjukkan bahwa intensitas  $I_2$  adalah kuadrat dari jarak  $d_2$  dari sumber. Demikian intensitas menurut hukum invers kuadrat sama dengan hukum invers kuadrat gravitasi.

Persamaan 13.15 digunakan untuk menentukan intensitas pada jarak  $d_2$  yang diberikan intensitas  $I_1$  pada  $d_1$ . Sebagai contoh, tabel 13.3 menunjukkan bahwa intensitas dari pesawat jet adalah  $I_1 = 10^2 \text{ W/m}^2$  dengan jarak  $d_1 = 30\text{m}$ . intensitas  $I_2$  dengan jarak  $d_2 = 3000\text{m}$  dari pesawat adalah

$$I_2 = \frac{d_1^2}{d_2^2} I_1 = \left( \frac{30\text{ m}}{3000\text{ m}} \right)^2 (10^2\text{ W/m}^2)$$

$$= 10^{-2}\text{ W/m}^2$$

Tabel 13.3 menunjukkan bahwa ini sama dengan level intensitas dari 100 dB. Demikianlah mendekati 2 mi dari pesawat, level kebisingan sama dengan rel kereta api

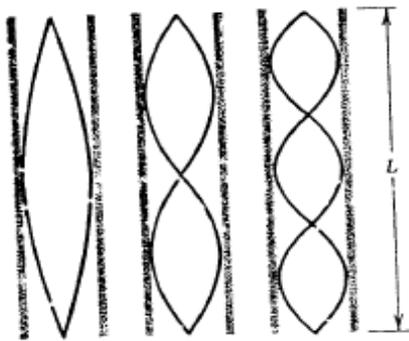


Gambar 13.8 bunyi dari titik sumber berpencah keluarbidang radial dalam semua bagian

### n Resonansi

Pada rongga udara, seperti tali bercampur pada kedua yang terakhir, hanya dapat bervibrasi tentunya pada pertimbangan frekuensi pada karakteristik rongga. Dalam sesi 12.4 ditunjukkan bahwa kedua tali hanya bervibrasi dengan frekuensi yang sama dengan gelombang berdiri pada tali. Gelombang berdiri hanya gelombang panjang tertentu dan frekuensi yang tertentu dapat hadir dalam rongga. Frekuensi dari gelombang ini tergantung pada ukuran dan bentuk dari rongga, tetapi gelombang ini mudah hanya untuk dikalkulasi untuk rongga dari geometri yang sangat sederhana.

Pada kasus khusus bahwa rongga silinder dengan panjang L terbuka pada kedua pipa. Udara berhembus dari salah satu ujung silinder, gelombang yang dihasilkan pada sepanjang silinder bawah. Jika diameter silinder kecil dibandingkan dengan gelombang panjang, akan dipantulkan kembali ke silinder ketika menjangkau ujung. Superposisi dari gelombang sama dengan amplitudo dan frekuensi jalan berlawanan dengan direksi hasil pola gelombang berdiri. Tekanan tiap ujung adalah campuran tekanan atmosfer karena ujungnya terbuka ke atmosfer. Karena itu hanya gelombang berdiri yang mempunyai simpul di setiap ujung silinder (gambar 13.9).



Gambar 13.9 beberapa gelombang berdiri dalam pipa terbuka. Kurva ditunjukkan dengan tekanan bervariasi dalam tabung

Situasi ini identik dengan kedua ujung tali: hanya gelombang berdiri yang mungkin mempunyai gelombang panjang diberikan oleh:

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad \text{atau} \quad \lambda_n = \frac{2L}{n}$$

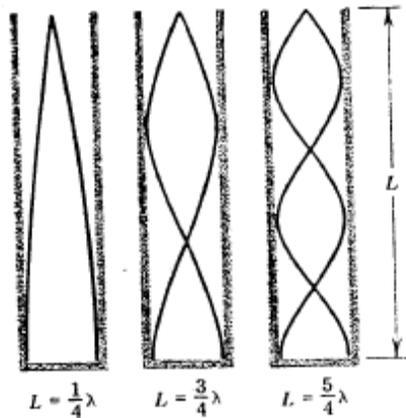
Dimana  $n$  adalah bilangan bulat. Frekuensi dari gelombang adalah

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L} \quad 13.16$$

Seperti frekuensi vibrasi, mengandung dasar,  $f_1 = v/2L$  dan semua harmoni  $f_n = nf_1$ .

Organ pipa dan instrumen angina, tergantung dalam suara manusia, menghasilkan nada ditetapkan gelombang berdiri dalam rongga. Bagaimanapun, karakteristik frekuensi adalah hanya deret harmonik jika rongga silinder sempurna terbuka pada kedua ujungnya. Untuk rongga yang bentuknya berbeda, frekuensinya tidak berbentuk deret harmonik.

Sebagai contoh, beberapa organ pipa tertutup pada ujung satu dan terbuka pada ujung yang lain. Seperti pipa yang mempunyai tekanan antinoda pada ujung yang terbuka karena pertukaran udara. (Gambar 13.4 menunjukkan bahwa tekanan mempunyai antinoda dimana saja berganti sebuah simpul). Karakteristik gelombang berdiri, kemudian mempunyai simpul yang tertutup dan antinoda yang terbuka. Gambar 13.10 menunjukkan tiga gelombang berdiri cukup untuk kondisi ini.



Gambar 13.10 Beberapa gelombang berdiri dalam tabung tertutup. Kurva ditunjukkan dengan tekanan bervariasi dalam tabung

Gelombang ini mempunyai  $\frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{5}{4}, \dots$ , gelombang panjang dalam pipa jadi

$$L = m \frac{\lambda_m}{4} \quad \text{atau} \quad \lambda_m = \frac{4L}{m}$$

Dimana  $m$  adalah bilangan ganjil ( $m = 1, 3, 5, 7, \dots$ ). Karakteristik frekuensi adalah

$$f_m = \frac{mv}{4L} \tag{13.17}$$

Frekuensi dasar adalah  $f_1 = v/4L$ , dimana setengah frekuensi dasar dari pipa terbuka terdiri dari harmonik ganjil:  $f_1, 3f_1, 5f_1, \dots$

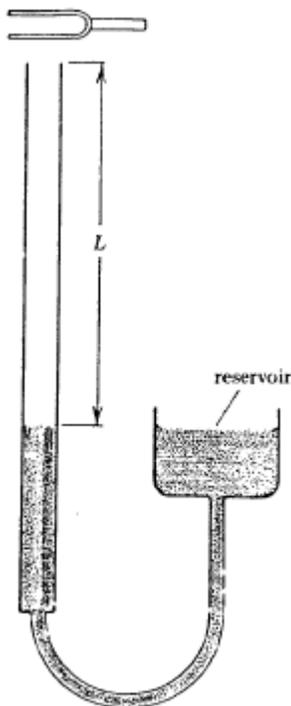
Untuk menetapkan gelombang berdiri pada rongga, hanya perlu pada udara dalam rongga bervibrasi dengan frekuensi mendekati 1 dari karakteristik frekuensi rongga. Garputala adalah bagian untuk yang dimaksud karena ketika diserang, vibrasi dengan frekuensi campuran  $f$  dan menghasilkan gelombang bunyi dari frekuensi yang sama. Tetapi, ketika garputala bervibrasi, hanya fraksi kecil dari energi mekanik adalah transformasi bunyi dan diam berhambur. Akibatnya, vibrasi garputala menghasilkan intensitas rendah gelombang bunyi.

Jika, vibrasi garputala diletakkan dekat ujung yang terbuka dari rongga akan mempunyai karakteristik frekuensi mendekati  $f$ , fraksi yang luas dari energi mekanik adalah diubah ke dalam gelombang berdiri amplitudo besar dalam rongga.

Fenomena ini disebut resonansi, demonstrasinya mudah dengan menghubungkan silinder dengan reservoir air, yang ditunjukkan pada gambar 13.11. Sebuah vibrasi garpu tala diletakkan di ujung silinder yang tertutup, saat panjang  $L$  pipa terbuka diatur oleh peningkatan dan penurunan reservoir. Ketika panjang pipa tertutup yang mempunyai karakteristik frekuensi yang sama dengan frekuensi garpu tala, bunyinya menjadi lebih keras karena resonansi dengan fraksi yang besar dari energi mekanik garpu tala diubah ke dalam energi bunyi. Instrument tali, seperti gitar dan biola, mempunyai resonansi rongga dari tali dengan intensitas bunyi. Tentunya, karakteristik frekuensi rongga tidak sama dengan semua frekuensi yang dimainkan talinya, tetapi untungnya resonansi dapat terjadi ketika frekuensi yang dikeluarkan  $f$  tidak sama dengan karakteristik frekuensi  $f_n$ . Ketika vibrasi tali bebas menghasilkan bunyi dengan amplitudo  $A_p$  pada frekuensi  $f$ , vibrasi rongga dengan frekuensi yang sama  $f$  dengan amplitudo yang lain  $A_p'$ . Perbandingannya

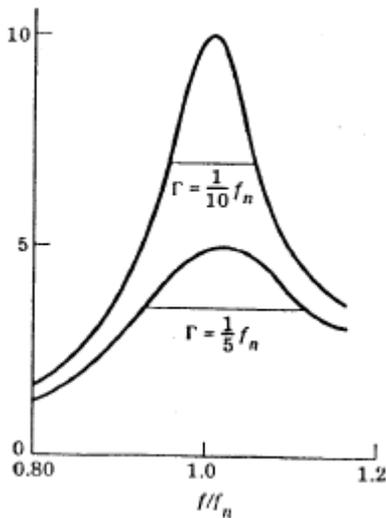
$$r = \frac{A_p'}{A_p}$$

Disebut dengan faktor resonansi. Ketika  $r$  lebih besar dari 1, rongga akan memperkuat bunyinya.



Gambar 13.11 sebuah silinder dengan reservoir yang berisi air. Dengan berbagai macam tinggi reservoir, panjangnya  $L$  dari kolom udara dalam berbagai macam silinder.

Faktor resonansi  $r$  lebih besar dari 1 ketika  $f$  tertutup dengan karakteristik frekuensi rongga  $f_n$  dan  $r$  lebih kecil ketika  $f$  jauh dari  $f_n$ . Ini ditunjukkan oleh kurva resonansi dalam gambar 13.12, plot  $r$  melawan  $f/f_n$  untuk dua tipe kasus. Ujung kurva ini ketika  $f/f_n = 1$ , ketika frekuensi keluar  $f$  sama dengan karakteristik frekuensi  $f_n$ . Didefinisikan, kuantitas  $\Gamma$  adalah lebar kurva resonansi pada nilai 70 dipuncak. Bahwa,  $r$  lebih kecil dari 70 % pada nilai puncak ketika  $f$  antara  $f_n - 1/2\Gamma$  dan  $f_n + 1/2\Gamma$ . Dapat ditunjukkan bahwa nilai puncak  $r$  sama dengan  $f_n/\Gamma$ , jadi luas kurva respon (besar  $\Gamma$ ) mempunyai lebih sedikit pembesaran daripada batas kurva respon (kecil  $\Gamma$ ).



Gambar 13.12 dua tipe respon kurva.

Dalam rancangan instrument tali, frekuensi  $f_n$  dan lebar  $\Gamma_n$  dari rongga hampir seperti semua resonansi. Frekuensi  $f_n$  tergantung pada ukuran dan bentuk rongga, dan lebar  $\Gamma_n$  tergantung pada bahan rongga. Bagaimanapun, hanya sekarang ini mempunyai rincian dari hubungan antara rancangan dan fungsi dari musik instrumen dipelajari dengan rinci. Dengan perkembangan teknologi canggih, dalam

seni instrumen yang dibuat, fisika diharapkan dapat memperbaiki rancangan instrumen ini, tetapi menemukan instrumen tradisional perlahan-lahan telah dicoba dan kesalahannya mendekati bentuk sempurna sangat kecil kemungkinannya untuk diperbaiki.

Sesi berikutnya akan dijelaskan semua instrumen, suara manusia.

### **13.5 Suara Manusia**

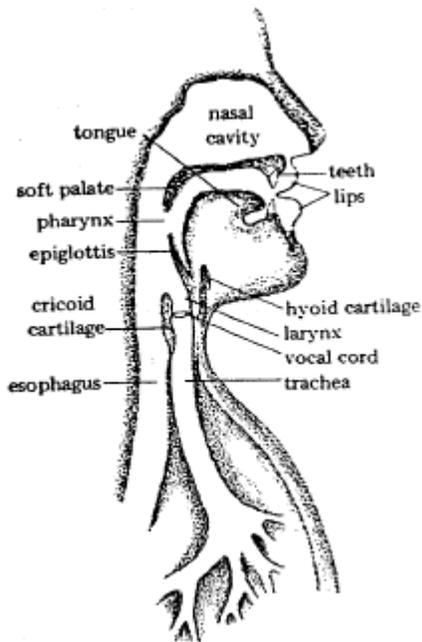
Melalui evolusi, organ pernafasan dan pendengaran manusia mempunyai perkembangan fungsi yang menghasilkan banyak deretan bunyi. Kemampuan untuk menghasilkan bunyi tertentu, yang dipelajari anak-anak, tetapi organ yang bagus menghasilkan bunyi yang dibawa. Bunyi ini digunakan untuk simbol komunikasi dengan orang lain yang mempunyai bahasa yang sama. Kemampuan manusia untuk berbicara dan menggunakan simbol bahasa adalah salah satu dari karakteristik unik yang membedakannya dengan manusia.

Hasil dari kata-kata dapat dibagi ke dalam dua tahap tertentu: (1) bunyi yang dapat didengar dan (2) kendali bunyi untuk menghasilkan suatu fonem yang terbatas. Sebuah fonem adalah bagian terkecil yang mempunyai fungsi peran dalam bahasa. Suatu bahasa mempunyai fonemnya masing-masing dan satu pembicara orang dewasa dari bahasa nya mungkin punya pelajaran kesukaran untuk melafalkan satu fonem yang tidak biasa di dalam bahasa lain.

Abjad hanyalah suatu kasarnya dan penyajian yang tidak akurat dari fonem-fonem Inggris. Ketika benar-benar 38 fonem dalam bahasa Inggris Amerika, beberapa huruf tidak menghadirkan fonem umum ketika beberapa fonem dihadirkan lebih dari satu huruf. Sebagai contoh, empat huruf yang dihadirkan berbeda vokal fonemnya: “ah” bunyi dalam ayah (father), “ae” bunyi dalam mempunyai (had), “aw” bunyi dalam memanggil (call), dan “ei” bunyi dalam take. Yang lainnya, huruf c dan k, kadang dihadirkan dalam fonem yang sama seperti cap dan kunci.

Semua fonem Inggris dihasilkan selagi menghembuskan udara yang dipaksa karena paru-paru berada di atas batang tenggorok, melalui pangkal

tenggorokan, ke dalam hulu kerongkongan, dan ke luar hidung dan mulut (gambar 13.13). Hulu kerongkongan adalah bagian dari jalan terusan di atas pangkal tenggorokan dan di belakang lisan dan rongga hidung. Pangkal tenggorokan adalah tumpukan dari tulang rawan antara hulu kerongkongan dan batang tenggorok; mengendalikan aliran udara melalui batang tenggorok dan mencegah makanan memasuki paru-paru. (Satu tulang rawan di dalam pangkal tenggorokan membentuk buah apel Adam di depan leher.). Ketika seseorang menelan, katup napas menutup pembukaan pangkal tenggorokan untuk mencegah makanan beralih.



Gambar 13.13 anatomi organ vokal manusia

Aliran udara dikendalikan oleh sepasang ikatan sendi yang dilipat di dalam pangkal tenggorokan, disebut dengan suara tali. Selama bernafas normal pita suara diperlonggar sehingga udara dapat lewat dengan bebas melalui pangkal tenggorokan. Suatu bunyi suara dihasilkan ketika pita suara menutup batang pangkal tenggorokan. Lalu, seperti udara dihembuskan, membangun tekanan di bawah pita

suara. Ketika mendapat tekanan cukup besar, udara dipaksa melalui pita suara, mengurangi tekanan di belakang. Secepat tekanan dikurangi, pita suara menutup kembali sehingga membangun tekanan sekali lagi dan urutan itu diulangi.

Beberapa bunyi yang dihasilkan melalui mulut tanpa mempergunakan pita suara disebut Unvoiced sound. Misalnya p, t, k, s, f dan ch, kalau kita perincikan lagi maka:

- p, t dan k suara/bunyi letupan (plosive sound).
- s, f, dan ch suara/bunyi frikatif (fricative sound)
- ch kombinasi dari kedua tipe di atas.

Unvoiced sound merupakan aliran udara melalui penciutan atau dibentuk oleh lidah, gigi, bibir dan langit-langit.

Frekuensi dasar dari hasil vibrasi yang kompleks tergantung dari massa dan tegangan dari pita suara. Laki-laki mempunyai frekuensi suara 125 Hz sedangkan wanita 150 Hz. Frekuensi rendah dihasilkan penyanyi sekitar 64 Hz (C rendah) dan frekuensi tinggi (suara sopran) sekitar 2048 Hz.

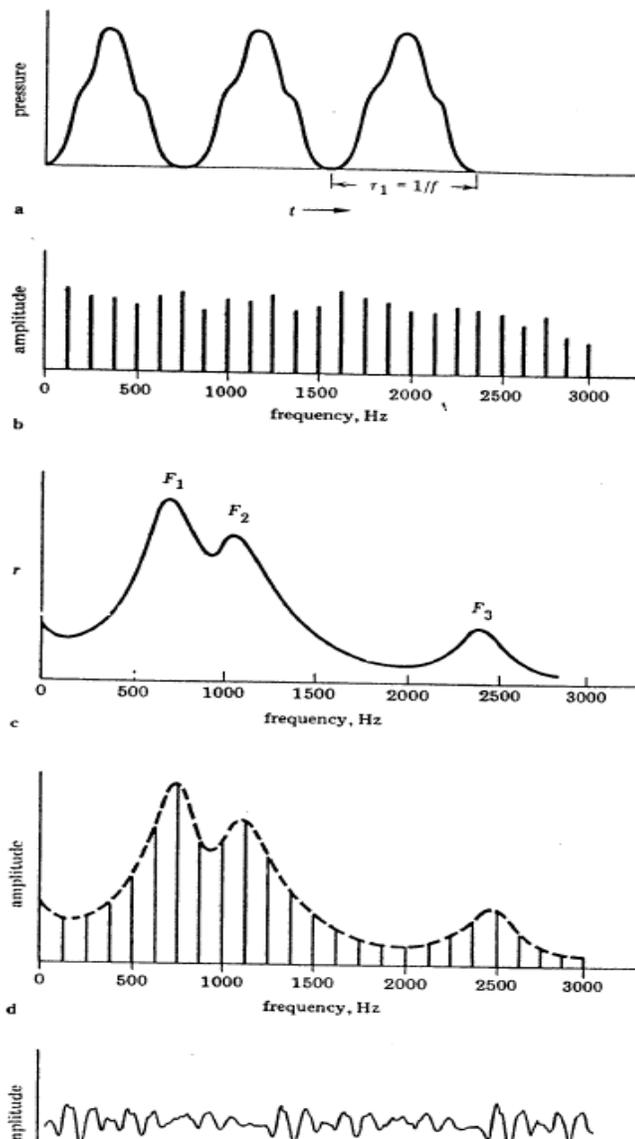
Dengan cara ini suatu rangkaian berkala dari pulsa bunyi dihasilkan dengan frekuensi tergantung keadaan tegangan dan massa dari pita suara. Di dalam umum, frekuensi menurun dalam laki-laki dibanding dengan wanita karena laki-laki mempunyai pita suara yang lebih besar. Bagaimanapun, dengan mengubah tegangan pita suara, seseorang dapat bertukar-tukar frekuensi oleh suatu faktor dari 3.

Karena suatu tegangan yang diberi, bunyi yang dihasilkan oleh pita suara adalah rangkaian berkala dari pulsa tekanan yang positif, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 13.14a. Seorang manusia dengan frekuensi  $f$  dari pulsa adalah sekitar 125 pulsa per detik. Karena pola dari pulsa berkala, dapat dianggap sebagai gabungan banyak gelombang sinus (sesi 12.3) bentuk frekwensi urutan yang selaras:

$$f_1 = 125 \text{ Hz}, f_2 = 2f_1, f_3 = 3f_1, \dots$$

Spektrum dari gelombang berisi banyak gelombang harmonik dengan amplitudo hampir sama, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 13.14b.

Ini adalah tahap pertama yang dihasilkan oleh suara, produksi suatu bunyi bersuara. Langkah yang kedua, artikulasi dari bunyi ke dalam suatu fonem, berlangsung di dalam hulu kerongkongan dan yang lisan dan rongga hidung. Bersama-sama menghasilkan suatu rongga suara, ukuran dan bentuk dikendalikan oleh posisi lidah, bibir-bibir, dan langit-langit lunak di dalam belakang mulut (gambar 13.13). Karena suatu ukuran dan bentuk yang diberi, rongga mempunyai frekwensi karakteristik sendiri, yang disebut frekwensi forman. Biasanya dua atau tiga forman di bawah 3000 Hz.



Gambar 13.14 tahap dalam menghasilkan fonem.

(a)deretan frekuensi dari pulsa bunyi yang dihasilkan oleh pangkal tenggorokan. (b) spektrum dari periodik pulsa. (c) kurva respon dari mulut dan batang kerongkongan ketika lidah diposisikan kedepan dan bawah dalam mulut. (d) spektrum bunyi setelah resonansi dalam rongga. (e) akhir gelombang bunyi.

Sebagai contoh, untuk membuat bunyi "ah" lidah itu diposisikan depan dan bawah mulut. Di dalam posisi ini, format tiga yang pertama (seorang manusia) adalah kira-kira 730, 1090, dan 2440 Hz. Seperti gelombang suara yang dihasilkan oleh pita suara lewat ke dalam rongga suara, rongga mulai beresonansi. Masing-masing format mempunyai kurva tanggapan, dengan demikian meski tidak satu pun dari frekwensi di dalam spektrum gelombang suara persisnya sepadan dengan frekuensi formant, frekwensi rongga resonansi dekat dengan formant-formant. Gambar 13.14c menunjukkan kurva tanggapan yang dikombinasikan ke tiga formant-formant yang membentuk ketika membuat bunyi "ah". Secara umum, tiga atau empat yang selaras bersifat cukup dekat dengan masing-masing formant untuk ditingkatkan oleh resonansi. Ini ditunjukkan dalam gambar 13.14d, yang digabung dengan gambar 13.14b dan c.

Jika dasarnya  $f_1$  adalah 125 Hz, harmonik tertutup untuk formant pertama ( $F_1 = 730$  Hz) dalam "ah" adalah  $f_6 = 6 \times 125 \text{ Hz} = 750 \text{ Hz}$ . Ini akan mempunyai amplitudo yang besar dalam rongga suara, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 13.14d. harmonik yang berdekatan,  $f_5 = 625 \text{ Hz}$  dan  $f_7 = 875 \text{ Hz}$ , juga akan ditingkatkan tetapi tidak seperti  $f_6$ . Akibatnya, spektrum dari bunyi diubah setelah masuk ke rongga suara. Gambar 13.14b dan b memberikan spektrum dari bunyi "ah" sebelum dan setelah masuk ke rongga suara, dan gambar 13.14a dan e menunjukkan pola gelombang yang sama.

Singkatnya, tahap pertama dalam menghasilkan suara adalah dihasilkan oleh tali vokal dari periode gelombang dengan spektrum yang mendekati amplitudo

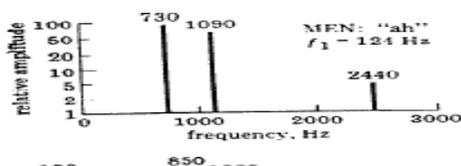
harmonik. Tahap kedua adalah peningkatan pemilihan dari beberapa gelombang harmonik oleh resonansi dalam rongga suara.

Perbedaan bunyi huruf vokal adalah dibedakan oleh frekuensi forman, yang dikontrol oleh posisi dari lidah dan bentuk mulut. Sebagai contoh, bunyi “ah” dibuat dengan lidah bawah dan depan dalam mulut (posisi depan terbuka), dimana bunyi “ooo” dibuat dengan lidah ke atas dan belakang (posisi belakang tertutup). Gambar 13.15 menunjukkan frekuensi rata-rata dan amplitudo relatif dari forman tiga yang pertama ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ) dari bunyi vokal “ah” dan “oo” oleh pria dan wanita. Frekuensi dasar  $f_1$  dari vokal juga diberikan dalam kasus lain.

Catatan bahwa dasarnya tidak berbeda antara vokal pria dan wanita, artinya permainan frekuensi dasar tidak berperan membedakan vokal bunyi. Walaupun frekuensi dari forman juga berbeda antara pria dan wanita, perbandingan dari frekuensi forman diperkirakan sama untuk vokal yang diberikan. Sebagai contoh, perbandingan  $F_2/F_1$  dan  $F_3/F_1$  untuk “ah” adalah 1.49 dan 3.34 untuk pria dan 1.44 dan 3.31 untuk wanita. Memunculkan perbandingan ini memainkan peran utama dalam membedakan satu vokal suara dari yang lainnya.

Seorang manusia dapat berbicara dengan suara yang tidak sebenarnya (fals) dengan meningkatkan tegangan di dalam pita suaranya. Ini mengubah frekuensi dasar dari pita suaranya tetapi tidak mengubah frekwensi forman dari rongga suaranya. Suara fals adalah dengan sempurna dapat dimengerti, mempertunjukkan bahwa frekuensi dasar tidak digunakan untuk membeda-bedakan antar fonem-fonem.

Pengaruh dari frekwensi forman di suara dapat ditunjukkan dengan bernafas suatu lungful dari gas helium. Kecepatan bunyi di dalam helium adalah 29 kali kecepatan di udara (tabel 13.1). Frekwensi forman dari suatu rongga bersifat sebanding dengan kecepatan bunyi di dalam rongga, seperti persamaan 13.16 dan 13.17, sehingga frekwensi forman dari rongga suara meningkat dengan faktor 29 ketika diisi dengan helium sebagai ganti udara. Seseorang berbicara dengan helium di dalam paru-parunya bunyinya seperti Donald Duck. Aquanauts, yang bernafas dengan

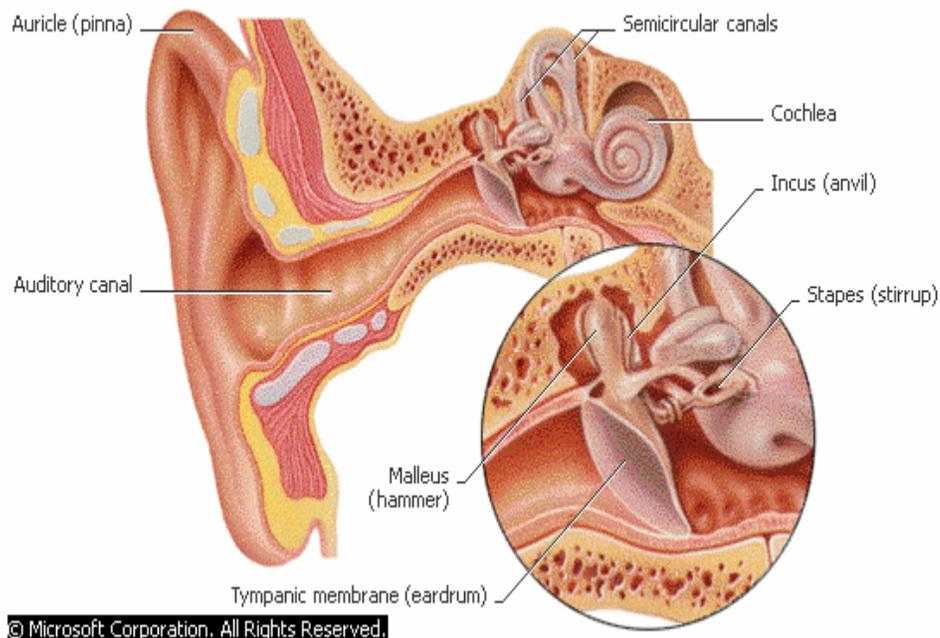


campuran gas berisi 97 persen helium saat 200ribu di bawah laut, mempunyai suara dengan pemahaman yang sukar satu sama lain.

Gambar 13.15 amplitudo relatif dari formant tiga yang pertama ( $F_1$ ,  $F_2$ , dan  $F_3$ ) dari bunyi “ah” dan “oo” yang diucapkan oleh pria dan wanita:  $f_1$  adalah frekuensi rata-rata dasar dalam setiap kasus.

### 13.6 Proses telinga dalam menerima bunyi

Telinga terdiri dari tiga bagian yang terpisah: telinga luar, telinga tengah, dan telinga dalam.



Gelombang bunyi dikumpulkan oleh cuping telinga (*Auricle*) lalu masuk ke dalam telinga luar menggetarkan gendang telinga (*Tympanic Membrane*) melewati kanal pendegaran (*Canal Auditory*). Di dalam telinga tengah, getaran-getaran ini dilewatkan melalui tiga buah tulang, yang diberi nama martil (*Malleus*), landasan (*anvil*), dan sanggurdi (*stirrup*). Tingkap oval, dan ketiga tulang tersebut berfungsi sebagai penguat (amplifier) tekanan bunyi. Tekanan bunyi diperbesar kira-kira 60 kali. Tekanan bunyi dari tingkap oval kemudian diteruskan melalui cairan di dalam *cochlea*. Getaran-getaran cairan di dalam *cochlea* mempengaruhi beribu-ribu saraf yang mengirim isyarat ke otak kita. Otak kitalah yang mengolah isyarat tersebut dan membedakan berbagai macam bunyi.

## **Penggunaan Dalam Bidang Kedokteran**

### **Aplikasi Ultrasonik dalam Diagnosis**

Kristal piezo elektrik yang bertindak sebagai transduser mengirim gelombang ultrasonic mencapai pada dinding berlawanan, kemudian gelombang bunyi dipantulkan dan diterima oleh transduser pula. Transduser yang menerima gelombang balik akan diteruskan ke amplifier berupa gelombang listrik kemudian gelombang tersebut ditangkap oleh CRT (osiloskop). Gambaran yang diperoleh CRT tergantung teknik yang dipergunakan. Ada 3 macam metoda dalam mendapatkan gambaran yaitu:

- 1) A Skanning untuk mendiagnosis tumor otak, memberi informasi tentang penyakit mata, daerah/lokasi yang dalam dari bola mata, menentukan apakah cornea atau lensa yang opaque atau ada tumor-tumor retina.
- 2) B Skanning untuk memperoleh informasi struktur dalam tubuh manusia misalnya lambung, hati, usus, mata, jantung janin. Untuk mendeteksi kehamilan sekitar 6 minggu, kelainan uterus/kandung peranakan dan kasus-kasus perdarahan abnormal.

- 3) M Skanning merupakan dua metode yang digunakan dalam kaitan untuk memperoleh informasi gerakan alat-alat dengan mempergunakan ultrasonic. Misalnya gerakan jantung dan gerakan vulva, atau untuk mengukur aliran darah.

### **Aplikasi Ultrasonik dalam pengobatan**

Ultrasonik memberi efek kenaikan temperatur dan peningkatan tekanan, efek ini timbul karena jaringan mengabsorpsi energi bunyi dengan demikian ultrasonik dipakai sebagai diatermi/pemanasan. Ultrasonic dapat dipakai untuk menghancurkan jaringan ganas (kanker).

Pada penderita Parkinson, penggunaan ultrasonik dalam pengobatan sangat berhasil namun sangat disayangkan untuk memfokuskan bunyi kearah otak sangat sulit. Sedangkan pada penderita maniere dimana keadaan penderita kehilangan pendengaran dan kesetimbangan, apabila diobati dengan ultrasonik dikatakan 95 % berhasil baik, ultrasonik menghancurkan jaringan dekat telinga tengah.